

# 血流制限を併用した筋力トレーニング 性差を考慮した至適プロトコルの確立

北 翔 大 学 沖 田 孝 一  
(共同研究者) 同 吉 田 真  
北海道教育大学 森 田 憲 輝  
北 海 道 大 学 横 田 卓  
北 翔 大 学 堀 内 雅 弘

## Resistance Training with Blood Flow Restriction: Adjusting the Method for Gender Difference

by

Koichi Okita, Makoto Yoshida

*Department of Sport Education, Hokusho University*

Noriteru Morita

*Sports Education, Hokkaido University of Education*

Takashi Yokota

*Cardiovascular Medicine, Hokkaido University of Medicine*

Masahiro Horiuchi

*Northern Regions Lifelong Sports Research Center*

### ABSTRACT

**Background and Purpose:** Skeletal muscle bulk is becoming an important therapeutic target in medicine. In order to increase muscle mass, however, intensive mechanical stress must be applied to the muscles, and such stress is often accompanied by orthopedic and cardiovascular problems. Resistance exercise with blood flow restriction (BFR) is a new training method providing significant training effects

despite the use of low-intensity load. We observed that blood flow restriction (BFR) remarkably enhanced muscular metabolic stress in resistance exercise, although there was a wide range of individual differences in the responses. It is possible that these differences could be due to gender difference in muscular physiological characteristics. Therefore, we compared intramuscular metabolic stress during low-intensity resistance exercise with BFR between men and women. **Methods:** Twenty-six age-matched men ( $n=13$ ,  $22 \pm 4$  yrs) and women ( $n=13$ ,  $21 \pm 4$  yrs) were recruited and performed unilateral plantar-flexion (30 repetitions/min for 2 min) The exercise protocols were as follows: low-intensity exercise (L) with 20% of one repetition maximum (1-RM) L with BFR, and high-intensity of 65% 1-RM without BFR (H) BFR was applied by 130% of the subject's resting blood pressure. We added the three protocols of 30, 40% 1-RM with BFR and 20% 1-RM with high BFR at 200 mmHg to determine an optimal protocol. Muscular metabolic stress, defined as phosphocreatine and intramuscular pH decrease were evaluated by using  $^{31}\text{P}$ -magnetic resonance spectroscopy. **Results and Discussion:** Metabolic stresses were statistically similar between men and women in all protocols. Compared with L, metabolic stresses were enhanced similarly by BFR (L-BFR) in men and women, while those did not reach the levels in H. By increasing intensity to greater than 30% 1-RM, the metabolic stresses reached to those in H. **Conclusions:** Effects of resistance exercise with BFR on muscular stress might be similar in men and women. Optimal muscular stress in BFR exercise could be achieved by increasing mechanical intensity to 30%1-RM or greater especially in women.

## 要 旨

骨格筋量および筋力が、生命予後や疾患予後に影響を与えることが疫学的に証明され、それらを向上させるレジスタンス運動の重要性が注目されている。しかしながら、通常のレジスタンス運動には、高強度負荷が必要なため、高齢者、有疾病者および女性においては、運動器損傷や心血管系への過負荷を来す危険性から臨床的に困難なことが多い。一方、近年の研究において血流制限の併用により、低強度負荷を用いたレジスタンス運動においても、高強度負荷を用いた場合に匹敵する効果が得られることが報告された。本研究では、運動中の筋内代謝的ストレスの測定により、この新しいトレーニング

方法の女性における有効性を検討した。その結果、従来の高強度負荷を用いたレジスタンス運動では、女性の筋負荷がやや軽い傾向があるのに対し、血流制限ではその差は小さい傾向があり、血流制限の併用は、女性においてより有用である可能性が示唆された。しかしながら、男女ともに推奨されている方法では筋への負荷は、高強度と同等には達していなかった。方法の最適化については、男女とも血流制限圧を上昇させるより、負荷量を増加することで、高強度負荷に匹敵する筋内代謝的ストレスが得られることが示された。

## 緒 言

骨格筋の量および筋力が、ADL (activity of

daily living) や QOL (quality of life) のみならず生命予後や疾患予後に影響を与えることが疫学的に証明され、それらを向上させるレジスタンス運動の重要性が注目されている<sup>1)</sup>。横断的には、筋量および筋力が多いほど、死亡率が低く、また運動療法においても有酸素運動にレジスタンス運動を加えることで病態や予後を改善する効果はさらに増加する<sup>2-4)</sup>。

しかしながら、レジスタンス運動により目的とする効果（筋量および筋力増加）を得るには、最大筋力の 65%以上（50～80%）の高い負荷強度が必要となるため<sup>5)</sup>、高齢者、有疾病者および女性において施行するには、運動器損傷や心血管系への過負荷を来す危険性から臨床的に困難なことが多い<sup>6)</sup>。また、特に女性では、レジスタンス運動の効果が得られにくいことが知られている<sup>7,8)</sup>。

近年、血流制限の併用により、最大筋力の 20～40%程度の低強度負荷を用いたレジスタンス運動においても、高強度負荷を用いた場合に匹敵する効果が得られる可能性が報告された。低強度負荷を用いることで、前述のリスクが減少するため、高齢者、有疾患者および女性における臨床応用が期待されている<sup>9-11)</sup>。

レジスタンス運動の効果を評価するには、一定期間のトレーニング前後で骨格筋量や筋力の変化を調べるのが一般的であるが、期間が長くなると、栄養摂取状況の問題など他の因子の関与も無視できなくなる。我々は、トレーニング負荷の大きさを単回の運動における骨格筋内エネルギー代謝の変化を用いて評価することを提唱し、またその正当性を証明してきた<sup>12,13)</sup>。本研究では、同方法を用いて、女性および男性における血流制限を併用したレジスタンス運動の効果を評価し、その差異について検討を行った。またプロトコルの最適化に関する検討も追加した。

## 1. 方法

### 1.1 被験者

健常女性 13 名（年齢：20.8±3.8 歳）と年齢を対応させた健常男性 13 名（年齢：22.2±3.7 歳）、計 26 名を対象とした。

### 1.2 レジスタンス運動

仰臥位における右足関節底屈運動を毎分 30 回のペースで、総計 60 回（2 分間）施行した。運動には、独自に考案した装置を用い、ペダルを介して錘を正確に 5cm 挙上するよう調整し、運動負荷を定量的に行った。

### 1.3 負荷条件

①あらかじめ最大挙上重（1-RM: one repetition maximum）を測定し、その 20%を用いた低強度条件とその条件に加えて、先行研究に基づき、空気圧式カフを用いて、被験者の収縮期血圧の 1.3 倍で血流制限を行った低強度+血流制限、さらに一般的に推奨される 1-RM の 65%を用いた高強度条件の 3 条件にて運動を行った。

②追加実験として最適運動条件を知るために負荷量を 30%、40% 1-RM に増加した条件と血流制限圧を一律 200mmHg に増加した条件を追加し、同様の測定を行った。

### 1.4 骨格筋内エネルギー代謝の測定

被験者は、全身用 MR 装置内（1.5Tesla, Magnetom H15, Siemens, Erlangen, Germany）に設置した非磁性体で作成された運動装置において仰臥位となり、主動筋である下腿三頭筋の中央部に<sup>31</sup>P 励起用の表面コイル（直径 80 mm）を固定し、磁気共鳴分光法<sup>14)</sup>による測定を安静時および運動中 30 秒ごとに行った（図 1）。得られた高エネルギーリン酸スペクトルからクレアチンリン酸（phosphocreatine: PCr）および無

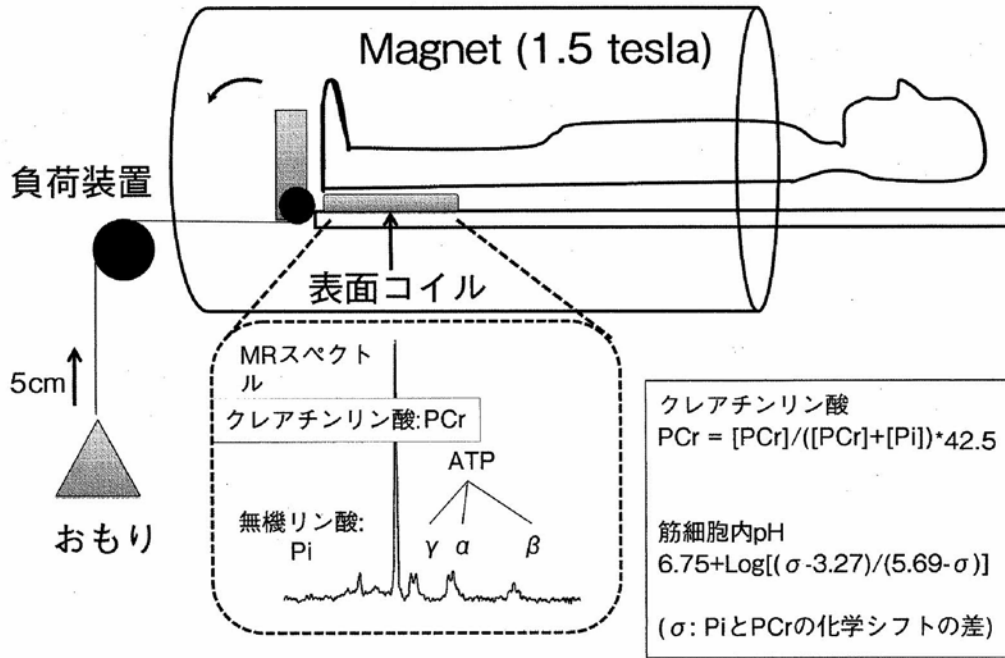


図1 磁気共鳴スペクトロスコープによる運動時骨格筋エネルギー代謝の測定

機リン酸 (inorganic phosphate: Pi) の曲線下面積を算出した。スペクトルの大きさは相対値であるが、クレアチンリン酸が分解していく過程で [PCr] と [Pi] の和は理論上一定であることから、先行研究に基づいて<sup>15, 16)</sup> その和を便宜上 42.5mM と仮定し、クレアチンリン酸量を絶対値として算出した。筋細胞内 pH は、クレアチンリン酸と無機リン酸のピークの化学シフトの差を用いて算出し、無機リン酸に二峰性のピークが認められた場合は、両ピークから算出した pH を標準化した値を採用した<sup>17, 18)</sup>。

### 1.5 統計処理

記述データは、平均 ± 標準偏差で表し、図は、平均 ± 標準誤差で表示した。ベースラインの基礎データにおける群間比較には、対応のない t 検定を用いた。各運動条件におけるクレアチンリン酸および筋細胞内 pH の経時的変化の群間 (男女) 比較は、混合モデル二元配置反復測定分散分析 (mixed-model 2-way repeated-measures ANOVA, 群間因子: 性差, 群内因子: 時間) を用いて行った。全例および各群における運動条件間

のクレアチンリン酸および筋細胞内 pH の経時的変化の比較は、二元配置反復測定分散分析 (2-way repeated-measures ANOVA, 運動条件 × 時間) を用いて行った。運動条件間あるいは男女間の交互作用が認められた場合は、Bonferroni の多重比較 (post-hoc) により検定した。統計学的有意水準は、 $p < 0.05$  とした。すべての検定は、ウンドウズ用統計解析ソフト Statview 5.0 (SAS Institute) を用いて行った。

## 2. 結果

基礎データは、表 1 に示す通りであり、女性の 1-RM は男性に比べて有意に低かったため、各

表 1 被験者の基礎データ

項目	男性 (n=13)	女性 (n=13)
年齢, 才	22.2 ± 3.7	20.8 ± 3.8
身長, cm	171.9 ± 4.4	160.5 ± 4.0*
体重, kg	65.9 ± 6.3	53.5 ± 6.7*
体格指数	22.3 ± 2.4	20.8 ± 2.3
収縮期血圧, mmHg	124.2 ± 11.7	106.5 ± 6.3*
血流制限圧, mmHg	161.5 ± 15.2	138.5 ± 8.1*
1-RM, kg	50.7 ± 6.6	31.8 ± 8.3*
20%1-RM, kg	10.2 ± 1.2	6.4 ± 1.6*
65%1-RM, kg	33.1 ± 4.3	20.8 ± 5.3*

\*  $p < 0.05$ , 男性 vs 女性. 平均 ± 標準偏差

条件における絶対的負荷量は、女性において低値となっている。また収縮期血圧も女性において低値であったため血流制限圧も低くなっている。

### 2.1 骨格筋内エネルギー代謝

①図2に安静から運動時における骨格筋内クレアチンリン酸の経時的変化を示した。両群において、血流制限によりクレアチンリン酸と筋細胞内pHは、血流制限非施行に比べ有意に大きく低下した。しかしながら、高強度条件のレベルには達していなかった。各条件・時間において、男女間の統計学的有意差は見られなかった。図3は筋細胞内pHの経時的変化を示したグラフであ

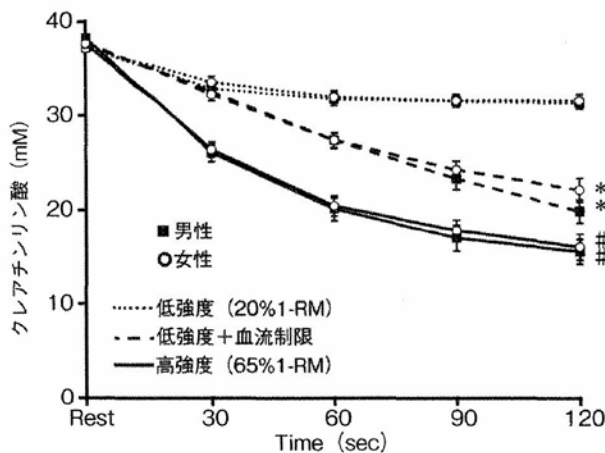


図2 運動中のクレアチンリン酸の変化

各条件において優位な性差は認められなかった  
\* $p < 0.05$ , vs 低強度 (20% 1-RM), # $p < 0.05$ , vs 低強度+血流制限 by ANOVA, post hoc. 平均±標準誤差

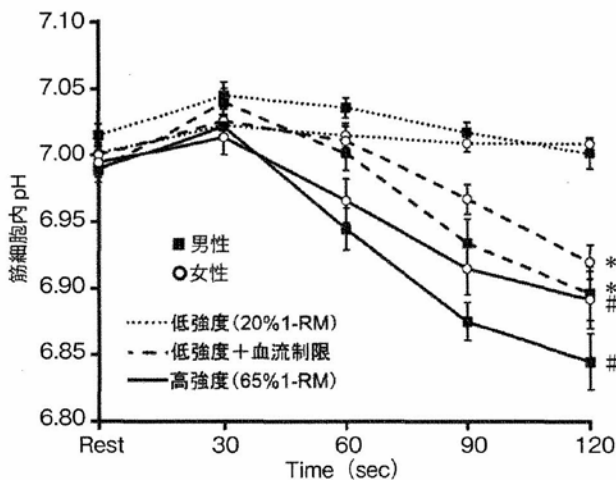


図3 運動中の筋細胞内pHの経時的変化

各条件において優位な性差は認められなかった  
\* $p < 0.05$ , vs 低強度, # $p < 0.05$ , vs 低強度+血流制限 by ANOVA, post hoc. 平均±標準誤差

る。高強度条件において、女性における筋内pHの低下が小さく見えるが、クレアチンリン酸同様に各条件・時間においても男女間の統計学的有意差はみられなかった。運動条件間の差異は、クレアチンリン酸と同様であった。

②図4に最適化を検討した結果を示した。血流制限圧を増加した条件では、代謝的負荷の有意な増強は認められず、負荷量を30% 1-RMに増加した条件にて、両群とも高強度負荷との有意差は消失した。しかしながら、統計学有意差はないものの、高強度負荷条件と血流制限条件における女性の代謝的負荷は男性に比べて小さい傾向が認められた。

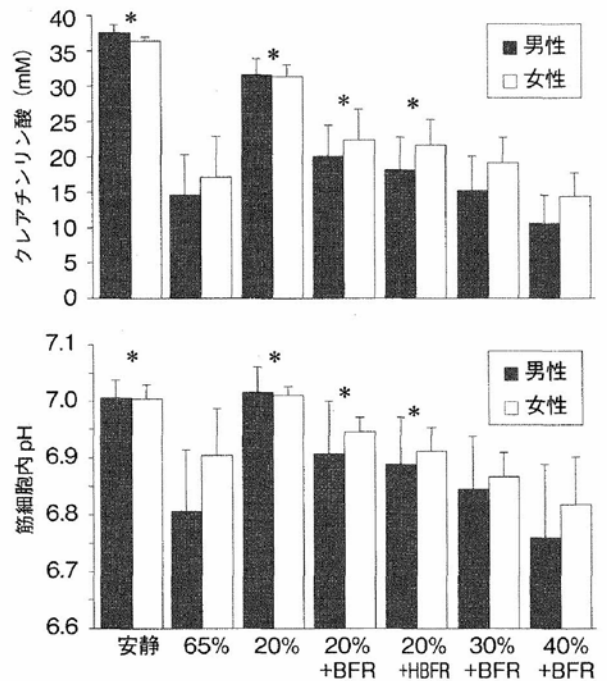


図4 最適条件の検討

運動終点におけるクレアチンリン酸(上)および筋細胞内pHの低下(下)。負荷量は最大挙上重量に対する比率で表している。  
\* $p < 0.05$ , vs 65% 1-RM by ANOVA, post hoc

### 3. 考察

女性における血流制限下低強度レジスタンス運動の効果を単回の運動におけるエネルギー代謝の変化によって評価したが、運動に伴う骨格筋内のクレアチンリン酸および筋細胞内pHの経時的変化と各時点の値において、男性と比較し

て明らかな差はみられなかった。これらのことから、血流制限下低強度レジスタンス運動では、女性においても男性と同等の効果が得られることが示唆された。

本研究では、血流制限を併用しない低強度負荷条件および高強度負荷条件においても骨格筋内エネルギー代謝の男女差はみられなかったが、筋内 pH については、高強度負荷条件において女性での低下が小さい傾向にあった。このことは、女性ではレジスタンス運動の効果が得られにくいとする過去の報告に相応する所見かも知れない。

これまでの研究で報告されているように女性においてレジスタンス運動の効果が得られにくい理由には、以下の原因が挙げられる。1つは、男性と女性の遅筋線維の割合の差である。骨格筋生検により男女の筋線維組成を調べた Staron らの研究では、女性の Type I 線維の割合は男性よりも高いことが示されている<sup>19)</sup>。また、Simoneau and Bouchard (1989) らの同様の研究においても、男性と女性の遅筋線維の占有率は男性が  $46 \pm 15\%$ 、女性が  $51 \pm 13\%$  であり、男性に比べ女性が有意に高いことが報告されている<sup>20)</sup>。筋線維型では、速筋線維に比べ遅筋線維は、細く、肥大しにくい<sup>5)</sup>。また従来のレジスタンス運動は、速筋線維を動員することを目的とする運動様式であるが、遅筋線維が多いと、サイズの原理により<sup>21)</sup>、それらが先行して動員されるため速筋線維が動員されにくいことになる。さらに、それらの研究を支持するように、酸化系酵素である HAD (3-hydroxyacyl CoA dehydrogenase) とクエン酸回路内酵素である SDH (succinic dehydrogenase) の比 (HAD/SDH) も、男性に比較して女性が有意に高値を示すことが報告されている<sup>22)</sup>。女性の Type I 線維の割合や酸化系酵素の高い割合は、女性の筋疲労耐性に繋がり、持久性には有利ではあるが、一方、レジスタンス

運動においては、筋への負荷刺激は少なくなり、効果が小さくなることに繋がると推測される。2つ目は、最大筋力の差である。最大筋力の絶対値は、当然、男性の方が女性に比べ明らかに高く、男性の方が高い負荷強度を用いてレジスタンス運動を行うことになる。運動時の筋内圧は、負荷強度に応じて高くなるため、負荷が高いと、血管がより圧排され、血流が悪くなる。従って、特に血流制限を併用しない場合は、絶対筋力が高い男性において、レジスタンス運動時の筋内血流がより障害され、エネルギー代謝が亢進し、効果が得られるやすくなる可能性がある。血流制限を併用することで、筋線維組成の違いによる疲労耐性の差や筋力の違いによる筋内圧の差に起因する筋負荷の男女差が是正される可能性が示唆された。

### 3.1 プロトコルの最適化

本研究では、先行研究にて用いられている低強度負荷 (20% 1-RM) と高強度負荷 (65% 1-RM) を用いて測定を行ったが、代謝的ストレスからみた運動筋への負荷は、これまでの報告と異なり、同等ではなく、低強度血流制限において小さかった。それを踏まえて、追加実験として、筋へのトレーニング負荷を高める方法を検討した結果、血流制限圧を増加させるより、機械的負荷の強度を増加させることで、筋への負荷を増強させることができた。男女とも 30% 1-RM を用いることで、65% 1-RM 負荷と統計的に差のない筋負荷を得ることができた。しかしながら、有意差はないものの、高強度および血流制限条件において、女性の負荷が男性より軽い傾向があり、男性における高強度と同等の筋負荷を得るためには、女性では 40% 1-RM を用いて血流制限を併用するのが望ましいように思われた。

#### 4. 結 語

血流制限を併用したレジスタンス運動中の筋負荷は、男女で同等であり、効果も同等に得られることが示唆された。しかしながら、従来提唱されている最大挙上重量の20%の機械的負荷を用いた血流制限運動では、男女とも筋負荷が不十分な可能性があり、男性では、30%以上、女性では40%以上が望ましいと推察された。

#### 謝 辞

本研究は、平成23年度公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団の助成を受けて実地されたものである。

#### 文 献

- 1) Braith R.W., Stewart K.J.: Resistance exercise training: its role in the prevention of cardiovascular disease. *Circulation*, 113: 2642-2650(2006)
- 2) Heitmann B.L., Frederiksen P., Thigh circumference and risk of heart disease and premature death: prospective cohort study. *BMJ*, 339:b3292(online, p1-8) (2009)
- 3) Newman A.B., Kupelian V., Visser M., et al.: Strength, but not muscle mass, is associated with mortality in the health, aging and body composition study cohort. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.*, 61:72-7(2006)
- 4) Hülsmann M., Quittan M., Berger R., et al.: Muscle strength as a predictor of long-term survival in severe congestive heart failure. *Eur. J. Heart Fail.*, 6:101-7(2004)
- 5) Kraemer W.J., Ratamess N.A., Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 36:674-688 (2004)
- 6) Braith R.W., Beck D.T.: Resistance exercise: training adaptations and developing a safe exercise prescription. *Heart Fail Rev.*, 13:69-79(2008)
- 7) 宮下充正: 女性のライフステージから見た身体運動と健康, 杏林書店(1995)
- 8) Melnyk J.A., Rogers M.A., Hurley B.F.: Effects of strength training and detraining on regional muscle in young and older men and women. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 105:929-938(2009)
- 9) 石井 直方: 筋血流制限とトレーニング. 体育の科学 ;53(8) :564-568(2003)
- 10) Takarada. Y. Takazawa. H. Sato. Y., et al.: Effect of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in human. *J. Appl. Physiol.*, 88:2097-2106(2008)
- 11) Abe T., Yasuda T., Midorikawa T., et al.: Skeletal muscle size and circulating IGF-1 are increased after two weeks of twice daily KAATSU resistance training. *Int. J. KAATSU Training Res.*, 1:6-12(2008)
- 12) Suga T., Okita K., Morita N., Yokota T., et al.: Dose Effect on Intramuscular Metabolic Stress during Low-Intensity Resistance Exercise with Blood Flow Restriction. *J. Appl. Physiol.*, 108:1563-1567(2010)
- 13) Takada S., Okita K., Suga T., et al.: High-metabolic Stress During Resistance Exercise Might Provide Muscle Hypertrophy And Strength Increase Even With Low-mechanical Stimulus. *Med. Sci. Sports Exerc. suppl.*, 42(5) :498(2010)
- 14) Taylor D.J., Bore P.J., Styles P., et al.: Bioenergetics of intact human muscle: A 31P nuclear magnetic resonance study. *Mol. Biol. Med.*, 1:77-94(1983)
- 15) Harris R.C., Hultman E., Nordesjö L.O.: Glycogen, glycolytic intermediates and high-energy phosphates determined in biopsy samples of musculus quadriceps femoris of man at rest. Methods and variance of values: *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, 33:109-20(1974)
- 16) Kemp G.J., Radda G.K.: Quantitative interpretation of bioenergetic data from 31P and 1H magnetic resonance spectroscopic studies of skeletal muscle: an analytical review. *Magn. Reson. Q.*, 10:43-63 (1974)
- 17) Lanza I.R., Befroy D.E., Kent-Braun J.A.: Age-related changes in ATP-producing pathways in human skeletal muscle in vivo. *J. Appl. Physiol.*, 99:1736-44(2005)
- 18) Wilson J.R., McCully K.K., Mancini D.M., et al.: Relationship of muscular fatigue to pH and diprotonated Pi in humans: a 31P-NMR study. *J. Appl. Physiol.*, 64:2333-9(1988)
- 19) Staron R.S., Hagerman F.C., Hikida R.S., et al.: Fiber type composition of the vastus lateralis muscle

- of young men and women. *J Histochem Cytochem*, 48:623-9(2000)
- 20) Simoneau J.A., Bouchard C: Human variation in skeletal muscle fiber-type proportion and enzyme activities. *Am. J. Physiol.*, 257(4 Pt 1) :E567-72 (1989)
- 21) Henneman E., Somjen G., Carpenter D.O.: Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J. Neurophysiol.*, 28:865-879(1965)
- 22) Green H.J., Fraser I.G., Ranney D.A.: Male and female differences in enzyme activities of energy metabolism in vastus lateralis muscle. *J. Neurol. Sci.*, 65:323-31(1984)